

平成19年度「コンタクトライン近傍流体の動力学」活動報告書

東京理科大学 上野 一郎

1. 構成メンバ

氏名 (50 音順)	所属
上野 一郎	東京理科大学理工学部
木村 達人	神奈川大学工学部
小宮 敦樹	東北大学流体科学研究所
塩見 淳一郎	東京大学工学系研究科
松本 聡	宇宙航空研究開発機構
丸山 茂夫	東京大学工学系研究科

2. 本年度 WG 会合開催実績

(1) 第1回：2007/7/9, /10 (AJTec07 (Vancouver) 期間中に開催). 参加メンバー：上野・小宮・塩見・丸山.

(2) 第2回：2008/2/29 (東京大学工学部). 参加メンバー：上野・塩見・丸山・理科大学生1名.

○来年度より立ち上げ予定のサブグループにおける準備研究打合せ実績

(3) 第1回：2007/9/7 (東京理科大学野田キャンパス). 参加メンバー：上野・益子 (静岡大)・理科大学生2名.

(4) 第2回：2008/3/3 (東京理科大学野田キャンパス). 参加メンバー：上野・益子 (静岡大)・理科大学生2名.

3. 活動目的

有人・無人宇宙環境利用において熱流体関係技術開発に不可欠な要素として、微小重力 (以下 μg) 環境下において顕在化する『濡れ性』および『表面張力』の影響が挙げられる。固体面上を液体が進行あるいは後退する問題は、 μg 下での流体ハンドリング技術、すなわち、有人生活や科学実験等での流体輸送、短期間水質検査等の長期宇宙滞在に対する生命環境制御技術等の開発、熱交換機器等技術的

機器での流体ハンドリングに不可避な現象である。この現象を構成するのが、固液気3相境界線 (コンタクトライン) の移動であり、多相・多成分系での系では重要な問題となる。

コンタクトライン近傍流体は、分子スケールでの固液分子相互作用で決定する濡れ性・物質移動の問題から、表面張力と密接に関係している接触角、さらに移動液滴の形状および分裂・合体などを含む。また、コンタクトライン前方には先行薄膜と呼ばれる薄い液膜が形成することが知られており、ミクロスケールでの化学反応制御などにおいて非常に重要な存在となる。

本WGでは、特殊環境下での熱物質輸送の鍵となる先行薄膜、および表面張力を利用した流体・粒子輸送に着目し、地上での実験および数値計算、さらに航空機等を利用した微小重力実験を体系的に行い、将来の長時間宇宙実験実施を目指すとともに、有人・無人宇宙環境利用において熱流体関係技術開発に不可欠な要素である、『濡れ性』および『表面張力』が引き起こすメゾスコピック熱流体现象の理解および能動的制御の実現を目的とする。

なお本WGは、平成16年度採択の「宇宙環境利用流体科学 WG(SURF)」(代表：河村洋(東理大))中のサブグループの1つ『コンタクトライン近傍流体の動力学』として活動を開始し、翌平成17年度より独立して『コンタクトライン近傍流体の動力学』研究班 WG として活動を行ってきた。

4. 活動内容

本研究グループでは、前述の通り主に実験および分子動力学法を用いた数値計算から当該現象にアプローチしている。研究体制および内容を以下に示す。

○実験的研究 [担当：上野 (東理大), 小宮 (東北大), 松本 (JAXA)]

(i) 高精度干渉計を用いた、固体面上を移動する液滴前縁および後縁コンタクトライン近傍流体のプロファイル再構築 (Fig. 1) (上野・小宮・松本), (ii) 位相シフト技術の導入による

干渉計の高精度化（小宮・松本），
(iii) コンタクトラインの移動に対する重力および固体面上温度勾配の影響(Fig. 2)（上野）．

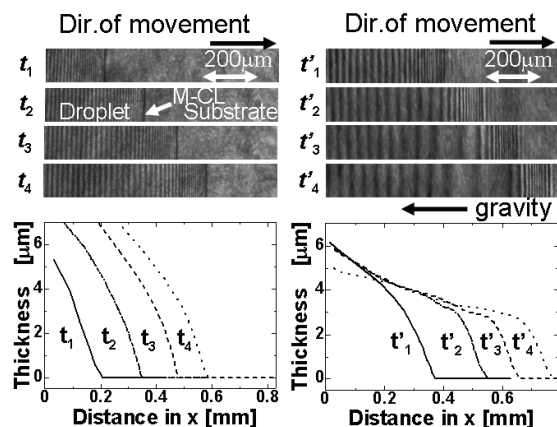


Fig. 1 Time series of interferogram snapshot of moving droplet in the vicinity of the contact line in the case of 5cSt-silicone oil - silicon wafer system. Time interval between each frame, $t_{i+1} - t_i$, is constant at 5 s.

(i)では，これまでの研究成果による前縁部近傍流体の動力学に関する知見の蓄積に加え，さらに後縁部近傍流体に関する知見蓄積を目指した新しい実験的研究を開始した．今年度は特に，移動液滴前方に存在する先行薄膜と呼ばれる領域の存在長さの計測を試み，従来の理論的研究および実験的研究との比較を行った．(iii)でも関連内容を記述する．

(ii)においては，(i)でも記述した先行薄膜領域の長さおよび厚さのより精密な計測実現を目指して，当該実験系における位相シフト技術の導入を行ってきた．今後は，現実装置系に組み込み，より高精度な先行薄膜存在領域の検出を目指す予定である．

(iii)では，これまで無視されてきた重力の影響を明らかにする目的で，傾斜面上に存在する液滴前縁部・後縁部に注目し，先行薄膜存在領域の検出を試みた．これまでの等温系での実験だけでなく，実際の熱伝達機器等への応用を目指して，固体面上の温度分布を制御した状態での CL の移動に注目して実験を行ってきた．

さらに，WG 代表者の東京理科大学グループは，宇宙航空研究開発機構宇宙科学本部の石川毅彦准教授，稲富裕光准教授とともに航

空機実験を実施し，マイクログラビティ状態下での液膜前縁部の挙動および先行薄膜領域検出に関する予備的实验を行った．取得したデータは現在解析中である．また，今後も微小重力実験の実施を検討している．

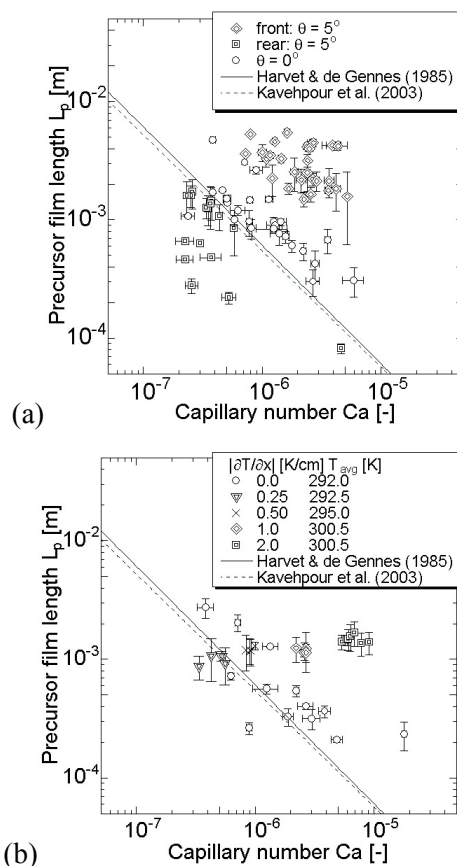


Fig. 2 Precursor film length as a function of non-dimensional number Ca at (a) front/rear regions of droplet traveling on an inclined solid substrate and (b) front region of droplet on a solid substrate with temperature gradient. For both cases, circle mark indicates detected value under the condition of $\theta = 0^\circ$ and $|\partial T/\partial x| = 0$ K/cm., solid and dashed lines indicate theoretical prediction⁽³⁾ and empirical equation⁽⁴⁾, respectively.

○分子動力学法を用いた数値計算〔担当：上野（東理大），木村（神奈川大），塩見・丸山（東大）〕

- (i) 固体面上を移動するナノスケール液滴に関する動力学（木村・上野），
- (ii) カーボンアルコール系に関するポテンシャル構築およびコード開発（木村），
- (iii) カーボンナノチューブ内外における水の

移動および相変化 (Fig. 4) (丸山・塩見)
 (iv) 移動するナノ液滴に対するナノスケール粗さの影響 (上野),
 (v) ナノスケール液膜に生起する不安定性 (Fig. 5) (上野).

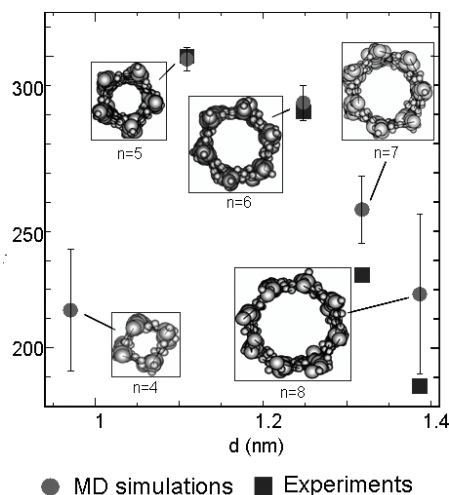


Fig. 4 Solidification temperature and spatial structure of water in SWNTs of various diameter.

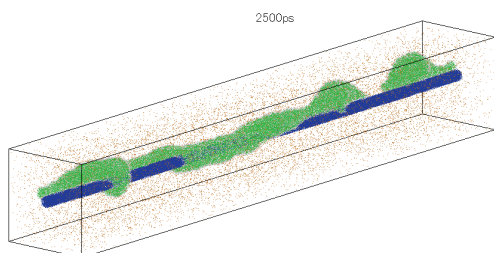


Fig. 5 Typical example of Rayleigh-Plateau-like instability on nanometer-scale Ar liquid bridge around Pt nano-wire.

(i) (ii)特に CL 近傍をミクロ的に注目し、分子スケールでの CL およびその移動時のダイナミクスの理解を目指して研究を行った。試験流体として水やアルコールを、さらに試験固体としてカーボンを採用した際のポテンシャル系の構築を行ってきた。これらの研究により、より現実的な現象解析が実現される。

(iii) 近年その工業的応用が爆発的に伸びているカーボンナノチューブに注目し、水との相互作用に関する知見蓄積を行ってきている。特に、カーボンナノチューブ内における水の相変化過程、および微小重力環境下での高品

質製造技術確立を目指した研究を行ってきた。

(iv)(v) いわゆる固体面上を流体が移動する際に問題となる「粗さ」に関し、固体平面基板や、あるいは近年その応用が盛んなナノメータスケールワイヤー上における液滴あるいは液膜の挙動に注目している。

また、来年度以降の研究実施に向け、代表者上野の東京理科大学グループを中心に、温度差マランゴニ効果により生起する2自由表面液膜内非線形対流場に対し、(i)通常重力下でも実現可能な小スケールでの地上実験の実施 (Fig. 6), および、(ii)3次元数値シミュレーションによる解析 (Fig. 7)を行ってきた。これにより、従来の研究により報告例の無い新しい熱流体力学的不安定の出現を認め、さらに、実験では出現しづらいが、数値計算により予測される不安定現象が存在することを明らかにした。

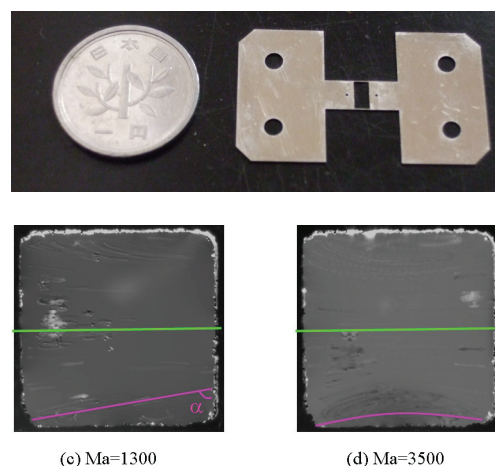


Fig. 6 Liquid film holder for experiment (top), and induced flow field in the film (bottom). Liquid film is formed in a square region indicated by a circle. Thickness of the holder is of 0.2 mm.

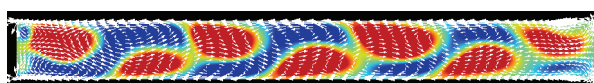


Fig. 7 Side view of predicted new instability in a thin film with 2 free surfaces. Right wall is hot and the left cold. Color indicates a temperature variance and vector the velocity field.

5. 成果

- (1) Abe, Y., Ueno, I. & Kawamura, H., Effect of Shape of HZ Liquid Bridge on Particle Accumulation Structure (PAS), Microgravity Sci. Technol. XIX, 84-86, 2007. (Best Poster Award)
- (2) Hirose, K., Konisho, T. & Ueno, I., Existing length of precursor film on inclined solid substrate, Microgravity Sci. Technol. XIX, 81-83, 2007.
- (3) Kizaki, Y., Konisho, T. & Ueno, I., Precursor film ahead droplet on solid with temperature gradient, Microgravity Sci. Technol. XIX, 106-108, 2007.
- (4) Ueno, I., & Kochiya, K., Effect of evaporation and solutocapillary-driven flow upon motion and resultant deposition of suspended particles in volatile droplet on solid substrate, Adv. Space Research, in appear.
- (5) Ueno, I., Konisho, T., Detection of precursor film existing ahead moving contact line of droplet, 18th Int. Symp. on Transport Phenomena (ISTP-18) (8/27-30 2007, Daejeon, Korea), 2007.
- (6) Konisho, T. & Ueno, I., Detection of advancing edge and existing length of precursor film ahead macroscopic contact line of droplet spreading on a solid substrate, Proc. Interdisciplinary Transport Phenomena V: Fluid, Thermal, Biological, Materials and Space Sciences (ITP2007) (10/12-19 2007, Bansko, Bulgaria), pp.11-16 -- 11-21, 2007. (oral)
- (7) Kochiya, K. & Ueno, I., Effect of suspended particles upon drying process of carrier-fluid droplet sitting on solid surface, Proc. Interdisciplinary Transport Phenomena V: Fluid, Thermal, Biological, Materials and Space Sciences (ITP2007) (10/12-19 2007, Bansko, Bulgaria), 2007. (oral)
- (8) Abe, Y., Ueno, I. & Kawamura, H., Dynamic particle accumulation structure (PAS) due to thermocapillary effect in noncylindrical half-zone liquid bridge, Proc. Interdisciplinary Transport Phenomena V: Fluid, Thermal, Biological, Materials and Space Sciences (ITP2007) (10/12-19 2007, Bansko, Bulgaria), pp.9-25 -- 9-28, 2007. (oral)
- (9) Kizaki, Y., Konisho, T. & Ueno, I., Precursor Film ahead Droplet Traveling on Solid with Temperature Gradient, 3rd Int. Symp. on Physical Sciences in Space (ISPS2007) (10/22-26 2007, Nara), 246-247, 2007. (poster)
- (10) Hirose, K., Konisho, T. & Ueno, I., Existing Length of Precursor Film ahead droplet on Inclined Solid Substrate, 3rd Int. Symp. on Physical Sciences in Space (ISPS2007) (10/22-26 2007, Nara), 248-249, 2007. (poster)
- (11) Torii, T. & Ueno, I., Flow Patterns and Particle

Behaviors in Thin Liquid Film Sustained in Rectangular Hole Exposed to Temperature Gradient, 3rd Int. Symp. on Physical Sciences in Space (ISPS2007) (10/22-26 2007, Nara), 250-251, 2007. (poster)

(12) Kaneko, H., Hikida, T. & Ueno, I., Phase-field simulation on effect of melt convection upon solidification process of pure material with free surface, 3rd Int. Symp. on Physical Sciences in Space (ISPS2007) (10/22-26 2007, Nara), 290-291, 2007. (poster)

(13) Hirose, K., Konisho, T., Ueno, I., Existing Length of Precursor Film on Inclined Solid Substrate, 2nd Int. Topical Team Workshop on Two-phase systems for ground and space applications (10/26-/28 2007, Kyoto, Japan), 2007. (Poster)

(14) Kizaki, Y., Konisho, T., Ueno, I., Precursor Film ahead Droplet on Solid with Temperature Gradient, 2nd Int. Topical Team Workshop on Two-phase systems for ground and space applications (10/26-/28 2007, Kyoto, Japan), 2007. (oral)

(15) J. Shiomi, T. Kimura and S. Maruyama, Molecular dynamics of ice-nanotube formation inside carbon nanotubes, J. Phys. Chem. C, (2007), 111, 12188-12193.

(16) C. S. Wang, J. S. Chen, J. Shiomi and S. Maruyama, A study on the thermal resistance over solid-liquid-vapor interfaces in a finite-space by a molecular dynamics method, Int. J. Therm. Sci., (2007), 46, 1203-1210.

(17) Y. Lin, J. Shiomi, S. Maruyama and G. Amberg, Electrothermal flow in Dielectrophoresis of Single-Walled Carbon Nanotubes, Phys. Rev. B, (2007), 76-4, 45419-1-45419-5.

(18) 丸山茂夫, 3章1節[14]高い撥水機能を持つ垂直配向単層カーボンナノチューブ膜, ねれと(超)撥水, (超)親水技術, そのコントロール, (2007), 221-225.

(19) Y. Shibuta and S. Maruyama, A molecular dynamics study of the effect of a substrate on catalytic metal clusters in nucleation process of single-walled carbon nanotubes, Chem. Phys. Lett., (2007), 437, 218-223.

(20) H. M. Duong, D. V. Papavassiliou, K. J. Mullen and S. Maruyama, Computational modeling of thermal conductivity of single walled carbon nanotube polymer composites, Nanotechnology, (2008), in press.

(21) J. Shiomi and S. Maruyama, Molecular Dynamics of Diffusive-Ballistic Heat Conduction in Single-Walled Carbon Nanotubes, Jpn. J. Appl. Phys., (2008), in press.

(22) S. Chiashi, M. Kohno, Y. Takata and S. Maruyama, Localized synthesis of single-walled carbon nanotubes on silicon substrates by a laser heating catalytic CVD, J. Phys.: Conf. Ser., (2007), 59, 155-158.